

На правах рукописи



Липужин Иван Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2017

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Научный руководитель – **СОСНИНА Елена Николаевна**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и
силовая электроника» федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

Официальные оппоненты – **ЕГОРОВ Андрей Валентинович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Теоретическая электротехника и
электрификация нефтяной и газовой
промышленности» федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени И.М.
Губкина» (г. Москва)

СОЛОВЬЕВ Алексей Валерьевич,
кандидат технических наук,
заместитель директора Федерального автономного
учреждения «Российский Речной Регистр»
Верхне-Волжский филиал (г. Нижний Новгород)

Ведущая организация – Центр физико-технических проблем энергетики
Севера Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Кольского научного центра
Российской академии наук (г. Апатиты)

Защита диссертации состоится «28» декабря 2017 года в 13 часов 00 минут в
аудитории 1315 на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 при
федеральном государственном образовательном учреждении высшего
образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева» по адресу: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте
Нижегородского государственного технического университета
им. Р.Е. Алексеева. <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим
направлять по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корпус 1,
ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.02.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Д.Ю. Титов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Районы Крайнего Севера и Дальнего Востока России обладают высоким ветровым потенциалом, что позволяет покрыть потребности в электроэнергии и повысить уровень надежности электроснабжения энергоудаленных потребителей за счет комбинированного использования традиционных источников энергии с экологически чистыми ветроэнергетическими установками (ВЭУ). Согласно программе инновационного развития ОАО «РАО Энергетические системы Востока» до 2020 г. сооружение ветро-дизельных электростанций (ВДЭС) в ДВФО позволит сэкономить до 10,5 тыс. тонн привозного дизельного топлива в год, повысить надежность электроснабжения автономных потребителей и сократить выбросы вредных веществ на 38 тыс. тонн.

Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения (СЭС) с ВДЭС является актуальной проблемой современных исследований.

Степень проработанности проблемы. Можно выделить несколько направлений исследований по повышению эффективности автономных СЭС с ВДЭС: выбор оптимальной структуры ВДЭС и применение накопителей электроэнергии (Б.В. Лукутин, В.Г. Титов, С.Г. Обухов, О.В. Крюков, Б.Н. Абрамович, В.Н. Гурницкий, А.В. Орлов, А.А. Аверин, А.А. Бельский, В.В. Вессарт, Е.Т. Ербаев, Е.В. Коноплев, Н. Nacfaire, S. Drouilhet, R. Sebastian), разработка методик проектирования автономных СЭС с ВДЭС (С.Ф. Степанов, В.А. Минин, В.Н. Карпов, А.М. Клер, Б.Н. Сонеев, Н.К. Малинин, А.В. Бобров, Н.В. Зуев, Д.Н. Карамов, В.Р. Киушкина, Р.В. Пугачев, С.В. Соломин, Т.Ф. Тугузова, Е.И. Baring-Gould, K. Keith, Y.-h. Wan, В.К. Parsons) и разработка и совершенствование алгоритмов управления режимами ВДЭС (Ю.Г. Шакарян, И.И. Артюхов, В.В. Елистратов, Н.М. Парников, Е.Ж. Сарсикеев, М.А. Сурков, З.П. Хошнау, М.А. Шиллер, A. Screve, A.N. Cuk Supriyadi).

Несмотря на растущий интерес к ВДЭС, опыт эксплуатации таких систем в России весьма ограничен, а существующие ВДЭС имеют невысокий КПД, отличаются сложностью конструкции и значительными затратами на эксплуатацию. Эффективного решения сопряжения ВЭУ, дизель-генераторной установки (ДГУ), накопителей электрической энергии и нагрузки пока не найдено. Все применяемые на практике системы сопряжения имеют недостатки (ограничение по мощности, необходимость во внешнем контроллере, отсутствие возможности масштабирования системы и др.) и разрабатываются под конкретные источники энергии. Большое разнообразие типов и параметров элементов ВДЭС усложняет выбор оптимальной структуры сопряжения. Разработка гибкого устройства с универсальным входом для подключения источников как переменного, так и постоянного тока, обеспечивающего на выходе напряжение, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 32144-2013, позволило бы повысить эффективность автономных СЭС с ВДЭС.

Вместе с тем, пока не исследовано влияние параметров автономной СЭС с ВДЭС на режимы ее работы. Совершенствование схемных решений сопряжения источников с нагрузкой требует проведения дополнительных исследований режимов работы автономной СЭС с ВДЭС, система управления которой должна поддерживать нормальные режимы ее работы.

Объект исследования – автономная система электроснабжения с ветродизельной электрической станцией малой мощности.

Предмет исследования – режимы работы автономной СЭС с ВДЭС и схемные решения по сопряжению энергоустановок ВДЭС с СЭС.

Цель диссертации – повышение эффективности автономных СЭС с ВДЭС за счет применения универсального преобразователя напряжения и обеспечения нормальных режимов работы автономной СЭС с ВДЭС.

Для достижения указанной цели в работе были решены следующие **основные задачи**:

1. комплексный анализ автономных СЭС с ВДЭС и исследование методов повышения эффективности их работы;
2. исследование нормальных режимов работы автономных СЭС с ВДЭС;
3. разработка универсального преобразователя напряжения (УПН) для подключения энергоустановок ВДЭС к автономной СЭС и алгоритма его функционирования, поддерживающего нормальные режимы работы системы;
4. разработка рекомендаций по повышению эффективности автономных СЭС с ВДЭС.

Методы исследования. В работе использовались методы анализа и обобщения данных, сравнения, математического и имитационного компьютерного моделирования, теории автоматического управления, электромеханических переходных процессов, мгновенной мощности, электрических машин.

Научная новизна работы:

1. Предложены критерии, позволяющие определить нормальные и ненормальные режимы работы автономной СЭС с ВДЭС.
2. Разработан универсальный алгоритм оценки режима работы автономной СЭС с ВДЭС, позволяющий определить параметры системы, при которых происходит нарушение нормального режима ее работы.
3. Разработаны имитационные модели автономных СЭС с ВДЭС, позволяющие проводить исследования нормальных режимов работы системы при соединении энергоустановок на постоянном и переменном токе.
4. Установлены закономерности влияния параметров и схемы подключения энергоустановок и потребителей автономной системы на режим работы СЭС с ВДЭС.
5. Разработан алгоритм работы УПН, учитывающий тип подключаемого источника энергии и требования обеспечения нормального режима работы автономной СЭС с ВДЭС.

На технические решения получены патент на полезную модель и свидетельство на программу для ЭВМ.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм оценки и обеспечения нормального режима работы автономной СЭС с ВДЭС, учитывающий параметры элементов системы и ее конфигурацию.
2. Имитационные модели автономных СЭС с ВДЭС для исследования влияния параметров и схемы подключения энергоустановок ВДЭС на режим работы автономной СЭС с ВДЭС.
3. Алгоритм работы УПН в составе автономной СЭС с ВДЭС, учитывающий требования обеспечения нормального режима ее работы.

4. Рекомендации по повышению эффективности автономных СЭС с ВДЭС.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечиваются использованием апробированных методов компьютерного моделирования электроэнергетических систем. Результаты моделирования в программном комплексе MatLab совпадают с практическими расчетами. Полученные результаты базируются на всестороннем анализе выполненных ранее научно-исследовательских работ. Измерения проводились с помощью поверенных анализаторов качества электрической энергии и осциллографов.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Критерии и алгоритм оценки режима работы автономной СЭС с ВДЭС могут быть использованы для определения параметров системы и внешних воздействий, которые обеспечат нормальную работу автономной СЭС с ВДЭС. Это позволит усовершенствовать систему управления ВДЭС, снизить технико-экономический ущерб и повысить эффективность электроснабжения автономных потребителей.

2. Результаты исследований и алгоритм работы УПН, учитывающий требования обеспечения нормального режима функционирования автономных СЭС с ВДЭС, использованы АО «Электро Интел» при проектировании и изготовлении опытного образца.

3. Рекомендации по повышению эффективности электроснабжения могут быть использованы при проектировании и реконструкции автономных СЭС с ВДЭС.

4. Материалы диссертации используются в учебном процессе кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» НГТУ при чтении лекций, проведении лабораторных и практических работ по курсам «Надежность и эффективность систем электроэнергетики», «Специальные вопросы электроснабжения» и «Автоматизация и управление систем электроснабжения».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались:

- на международных и зарубежных конференциях и форумах: 9-й форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности» - «REENFOR-2014», РАН, Москва, 2014 г.; VI НТК «Электроэнергетика глазами молодежи», ИГЭУ, Иваново, 2015 г.; XLIV, XLV НПК «Федоровские чтения», МЭИ, Москва, 2014, 2015 г.г.; XVIII НТК «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» - «Бенардосовские чтения», ИГЭУ, Иваново, 2015 г.; 9th, 10th Молодежная научная конференция «Young scientists towards the challenges of modern technology», WUT, Варшава, Польша, 2014, 2015 г.г.; II НТК «Пром-Инжиниринг», ЮУрГУ, Челябинск, 2016 г.; 16-й, 18-й Научно-промышленный форум «Великие реки», Нижегородская ярмарка, Н. Новгород, 2014, 2016 г.г.; XIII - XVI Молодежные НТК «Будущее технической науки», НГТУ, Н. Новгород, 2014 - 2017 г.г.; 9-ая, 10-ая НТК «Энергия», ИГЭУ, Иваново, 2014, 2015 г.г.; X Молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения», КГЭУ, Казань, 2015 г.; IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT-LA 2017), Кито, Эквадор, 2017 г.;

- на всероссийских конференциях: IX Научная конференция и молодежная школа «Возобновляемые источники энергии», МГУ, Москва 2014 г.; I НТК «Энергосберегающие технологии в АПК», НГИЭИ, Княгинино, 2014 г.; I, II НТК

«Актуальные проблемы электроэнергетики», НГТУ, Н. Новгород, 2015, 2016 г.г.; XXXIX сессия семинара «Кибернетика энергетических систем», НПИ, Новочеркасск, 2017 г.;

- на региональных конференциях: XXXII, XXXIII НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики» НГТУ, Н. Новгород, 2013, 2014 г.г.; XIX- XXII Нижегородские сессии молодых ученых (технические науки), Н. Новгород, 2014-2017 г.г.

Связь диссертации с научными программами. Работа выполнена в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на (2007-2013) 2014-2020 годы» по темам «Повышение эффективности и устойчивости локальной системы электроснабжения на основе оптимизации работы гибридного источника энергии с ветрогенератором» (Соглашение о предоставлении субсидии от 17.06.2014 №14.574.21.0009), «Разработка технических решений для создания энергоэффективной системы электроснабжения автономного потребителя на основе комбинированного использования возобновляемых источников энергии и устройств оптимального управления» (ГК №14.516.11.0006 от 15.03.2013). Также работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки России по теме «Повышение эффективности использования малой распределенной генерации на основе технологий «виртуальной электростанции» (ГЗ от 31.05.2017 № 13.2078.2017/ПЧ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 печатных работы, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в журналах, входящих в базу цитирования Scopus, 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Объем диссертации составляет 203 стр., из которых 122 стр. основного текста, включая 46 рисунков, 16 таблиц. Список использованных источников содержит 221 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи и методы исследования, определены основные научные положения, выносимые на защиту, отмечена их научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена комплексному анализу автономных СЭС с ВДЭС и исследованию методов повышения эффективности их работы.

Анализ силового оборудования ВДЭС показал, что для сопряжения источников энергии все чаще применяются гибридные преобразователи, объединяющие функции источника энергии, контроллера и резервного источника бесперебойного питания. В качестве генератора ВЭУ могут применяться как машины переменного, так и постоянного тока.

Анализ структурных схем автономных СЭС с ВДЭС показал, что для автономного электроснабжения объектов малой мощности наиболее распространены схемы подключения энергоустановок ВДЭС на переменном токе (рис. 1, а) и со вставкой постоянного тока (рис. 1, б).

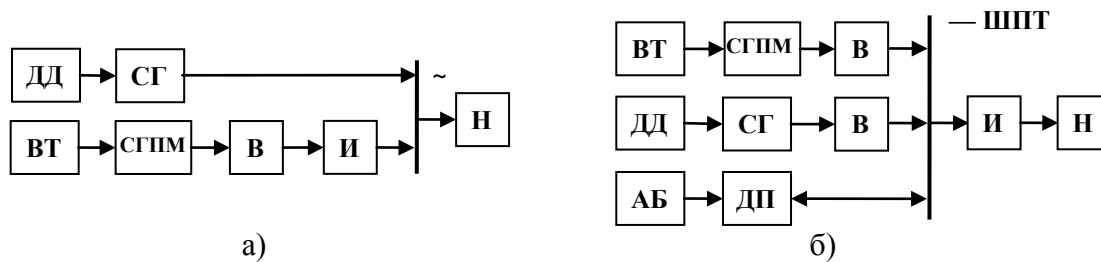


Рис. 1. Структурные электрические схемы автономных СЭС с ВДЭС:
 ДД – дизельный двигатель, СГ – синхронный генератор, ВТ – ветровая турбина, СГПМ – синхронный генератор на постоянных магнитах, В – выпрямитель, И – инвертор, Н – узел нагрузки, АБ – аккумуляторная батарея, ДП – двунаправленный преобразователь

Выделены особенности автономных СЭС с ВДЭС: нестабильность графика выдачи мощности ВЭУ вследствие стохастического характера изменения скорости ветра и плотности воздуха; случайность графика нагрузки потребителей электроэнергии автономной СЭС; соизмеримость мощностей генерирующих энергоустановок и потребителей.

Анализ эксплуатационных данных выявил причины и последствия нарушений нормального режима работы автономных СЭС с ВДЭС. Для обеспечения нормальной работы системы первостепенным является согласование в реальном времени процессов производства и потребления электроэнергии. Балансы электрических мощностей должна контролировать система управления.

Выполнен анализ работ по теме повышения эффективности автономных СЭС с ВДЭС. Определены критерии эффективности автономных СЭС с ВДЭС, основными из которых являются: показатели качества электрической энергии; надежности электроснабжения; экономичности и экологичности.

Вторая глава посвящена исследованию нормальных режимов работы автономных СЭС с ВДЭС.

Основным условием нормальной работы автономной СЭС с ВДЭС является поддержание баланса мощностей. Однако баланс мощности не учитывает электромеханические характеристики и особенности взаимодействия отдельных элементов в системе.

Предложены критерии, которые могут быть использованы для оценки нормальных и ненормальных режимов работы автономной СЭС с ВДЭС: 1) устойчивость работы ВЭУ; 2) отсутствие асинхронного хода синхронного генератора; 3) отсутствие обратного потока мощности в ДГУ; 4) отсутствие уравнительных токов в системе; 5) устойчивость узла нагрузки.

Устойчивость работы ВЭУ определяется условием (1):

$$\frac{dM_{\text{В}}}{dn} < \frac{dM_{\text{Г}}}{dn}, \quad (1)$$

где $M_{\text{В}}$ - механический момент турбины; $M_{\text{Г}}$ - электромагнитный момент генератора.

Проверка условия (1) осуществляется по мощностным $P=f(n)$ и моментным $M=f(n)$ характеристикам ветротурбины и генератора, приведенным к скорости вращения n одного и того же вала.

Как показали исследования, в составе ДГУ используются бесщеточные синхронные генераторы переменного тока. Условием работы синхронного генератора является равенство частот вращения ротора n_2 и результирующего

магнитного поля n_1 . Условие статической устойчивости (способность сохранять синхронное вращение при изменении внешнего вращающего или тормозного момента $M_{\text{вн}}$, приложенного к валу генератора), определяется выражением:

$$\theta < \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где θ – угол нагрузки.

При выпадении генератора из синхронизма возникает асинхронный ход, и машина переходит в асинхронный режим, что является причиной нарушения устойчивости системы.

При параллельной работе ДГУ и ВЭУ возможен переход генератора ДГУ в двигательный режим ($\theta < 0^\circ$), что приводит к нарушению электроснабжения потребителя и устойчивости системы в целом. В схемах ВДЭС с шиной постоянного тока (ШПТ) причиной этому может служить пробой выпрямительного устройства. Условие нормальной работы выпрямителя:

$$\frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{пр}}} < 1, \quad (3)$$

где $U_{\text{обр}}$ – обратное напряжение, приложенное к выпрямительному устройству; $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя.

При использовании синхронного генератора на постоянных магнитах мощность на выходе ВЭУ имеет кубическую зависимость от скорости ветрового потока. Из-за случайности графика нагрузки объекта и скорости ветрового потока в течении суток условия работы генераторов и их загрузка различны. Таким образом, при параллельной работе ВЭУ и ДГУ выходные напряжения $U_{\text{в1}}$ и $U_{\text{в2}}$ также будут различными, что приведет к разности потенциалов ΔU на ШПТ, под действием которой возникнет уравнивающий ток:

$$I_{\text{ур}} = I_{\text{в1}} + I_{\text{в2}} - I_{\text{инв}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{в1}}$ – ток выпрямителя ВЭУ; $I_{\text{в2}}$ – ток выпрямителя ДГУ; $I_{\text{инв}}$ – входной ток инвертора.

Появление уравнивающего тока приводит к ошибочной работе автоматики ВДЭС и дополнительным потерям мощности. Задачей системы управления ВДЭС является поддержание равенства напряжений на выходах выпрямителей генераторов.

В автономной СЭС мощность электродвигательной нагрузки соизмерима с мощностью источников, поэтому снижение напряжения в сети может привести к торможению асинхронных двигателей, и еще большему снижению напряжения – лавине напряжения. Для узлов нагрузки можно использовать практические критерии устойчивости, полученные путем анализа статических характеристик нагрузки $P_{\text{н}}=f(U)$ и $Q_{\text{н}}=f(U)$:

$$\frac{d\Delta Q}{dU} < 0 \text{ или } \frac{dE}{dU} > 0, \quad (5)$$

где ΔQ – небаланс в узле между мощностью, вырабатываемой генератором $Q_{\text{Г}}(U)$ и потребляемой нагрузкой $Q_{\text{н}}(U)$; U – напряжение в узле; E – ЭДС генератора.

С учетом предложенных критериев разработан алгоритм оценки режима работы автономной СЭС с ВДЭС (рис. 2).

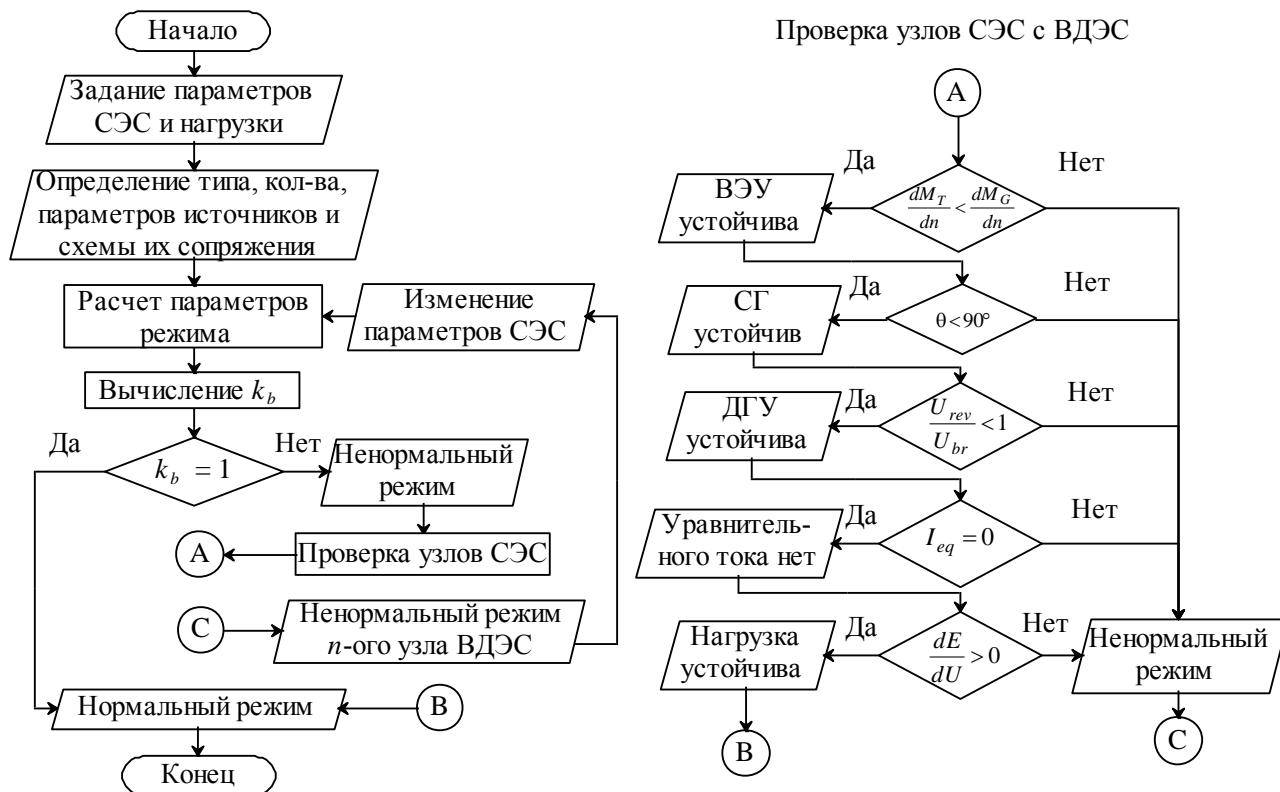


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки режима работы автономной СЭС с ВДЭС

Исходными данными являются параметры автономной СЭС с ВДЭС: вид, мощность и график нагрузки потребителей, тип, мощность и количество энергоустановок и их схема сопряжения, параметры ветра, уровень заряда накопителей энергии. Производится расчет параметров режима: тока, напряжения на шинах источников и нагрузки, частоты, значений активной и реактивной мощности. Определяются характеристики основных агрегатов системы: моменты на валу генераторов, угловые скорости, величина тока возбуждения, углы нагрузки и др.

Далее выполняется проверка сохранения балансов мощностей путем расчета коэффициентов баланса активной k_{bP} и реактивной k_{bQ} мощностей:

$$k_{bP} = \frac{P_{вэyi}}{P_{ни}} + \frac{P_{дгyi}}{P_{ни}} \pm \frac{P_{абi}}{P_{ни}} - \frac{P_{бни}}{P_{ни}} - \frac{\Delta P}{P_{ни}}; \quad (6)$$

$$k_{bQ} = \frac{Q_{вэyi}}{Q_{ни}} + \frac{Q_{дгyi}}{Q_{ни}} - \frac{\Delta Q}{Q_{ни}}, \quad (7)$$

где P_i , Q_i – активная и реактивная мощности в i -ом режиме, кВт; индексы: н – нагрузка, аб – аккумуляторная батарея, бн – балластная нагрузка, Δ – потери.

При равенстве коэффициентов (6) и (7) единице, режим считается нормальным, в автономной СЭС поддерживается равенство генерации и потребления активной P и реактивной Q мощностей. Оценка режима на первом этапе считается завершённой. При выявлении факта нарушения режима производится оценка причин нарушения балансов мощностей.

Второй этап заключается в оценке режима работы основных узлов автономной СЭС с ВДЭС. При нарушении хотя бы одного из критериев (1)-(5) режим является ненормальным. Такие режимы составляют область ненормальных режимов, подлежащую дальнейшему анализу с целью установления причин нарушения

критериев, формированию рекомендаций по повышению эффективности и ликвидации повторного возникновения нарушений. Далее производится корректировка параметров системы и заново выполняется расчет режима. Корректировка повторяется до тех пор, пока режим работы автономной СЭС с ВДЭС не становится нормальным.

Разработанный алгоритм оценки режима работы является универсальным. В зависимости от схемы построения СЭС с ВДЭС будет изменяться состав критериев на втором этапе оценки.

Для исследования алгоритма оценки режима работы разработаны имитационные модели автономных СЭС с ВДЭС. В качестве объекта моделирования выбраны схемы построения ВДЭС на переменном (рис. 1, а) и постоянном (рис. 1, б) токе. Модели состоят из четырех основных блоков: ВДЭС, распределительной электрической сети, комплексной нагрузки и измерительных устройств. На рис.3 приведен общий вид имитационной модели автономной СЭС с ВДЭС с шиной постоянного тока. Блок ВДЭС имитирует горизонтально-осевую ВЭУ и ДГУ. Избыток энергии ВЭУ запасается в аккумуляторных батареях (АБ).

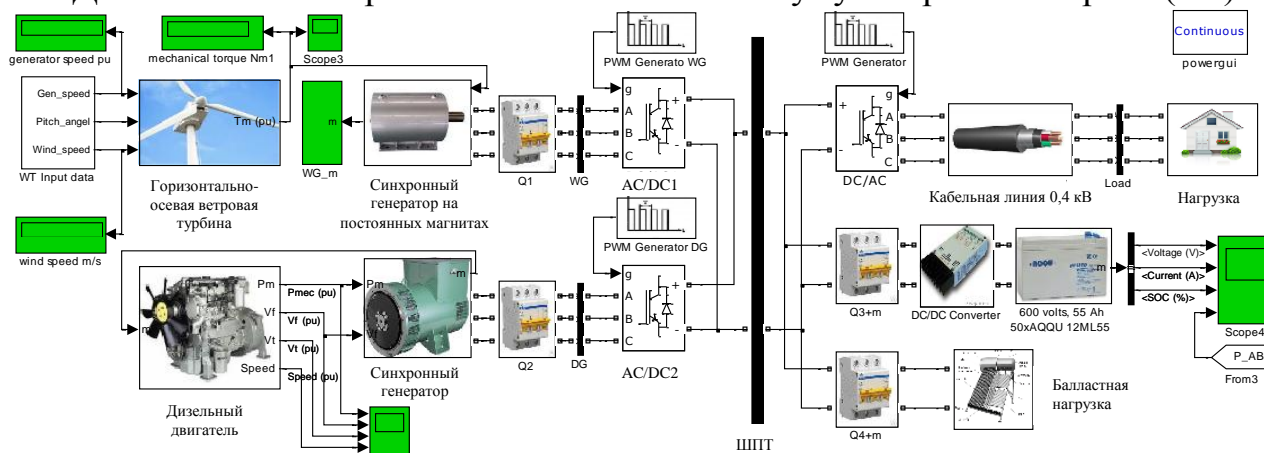


Рис. 3. Общий вид имитационной модели автономной СЭС с ВДЭС с шиной постоянного тока (без блока измерительных устройств)

К выводам инвертора «DC/AC» через распределительную электрическую сеть подключается блок комплексной нагрузки, которая может быть представлена симметричным постоянным сопротивлением, графиком нагрузки, трехфазным асинхронным двигателем 0,4 кВ с короткозамкнутым ротором с переменным тормозным моментом.

Входными данными для модели являются параметры СЭС с ВДЭС и ее режима работы в начальный момент симуляции. Задача исследования заключалась в определении параметров, при которых происходит нарушение нормального режима работы автономной СЭС с ВДЭС. На имитационной модели проведено исследование десяти режимов работы системы: 1. ВЭУ – нагрузка; 2. ДГУ – нагрузка; 3. АБ – нагрузка; 4. ВЭУ – нагрузка и заряд АБ; 5. ВЭУ и АБ – нагрузка; 6. ДГУ – нагрузка и заряд АБ; 7. ДГУ и АБ – нагрузка; 8. ВЭУ и ДГУ – нагрузка; 9. ВЭУ, ДГУ – нагрузка и заряд АБ; 10. ВЭУ, ДГУ и АБ – нагрузка.

Контроль параметров режима автономной СЭС осуществлялся на источниках, нагрузке и ШПТ. Нормальный режим работы при заданных входных данных оценивался по сохранению балансов мощностей.

Результаты исследований подтвердили гипотезу о высокой эффективности схемы на постоянном токе, позволяющей использовать энергоэффективные генераторы ВЭУ и ДГУ без учета стохастического характера ветра. С помощью выпрямителей, управляемыми воздействиями для которых служат сигналы обратной связи по току и напряжению, обеспечивается поддержание заданного значения выходного напряжения ВДЭС при равномерной загрузке параллельно работающих генераторов различной мощности. Это позволяет избежать возникновения уравнивающих токов на ШПТ.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента баланса активной мощности k_{bP} (б) от скорости ветра при разных значениях нагрузки.

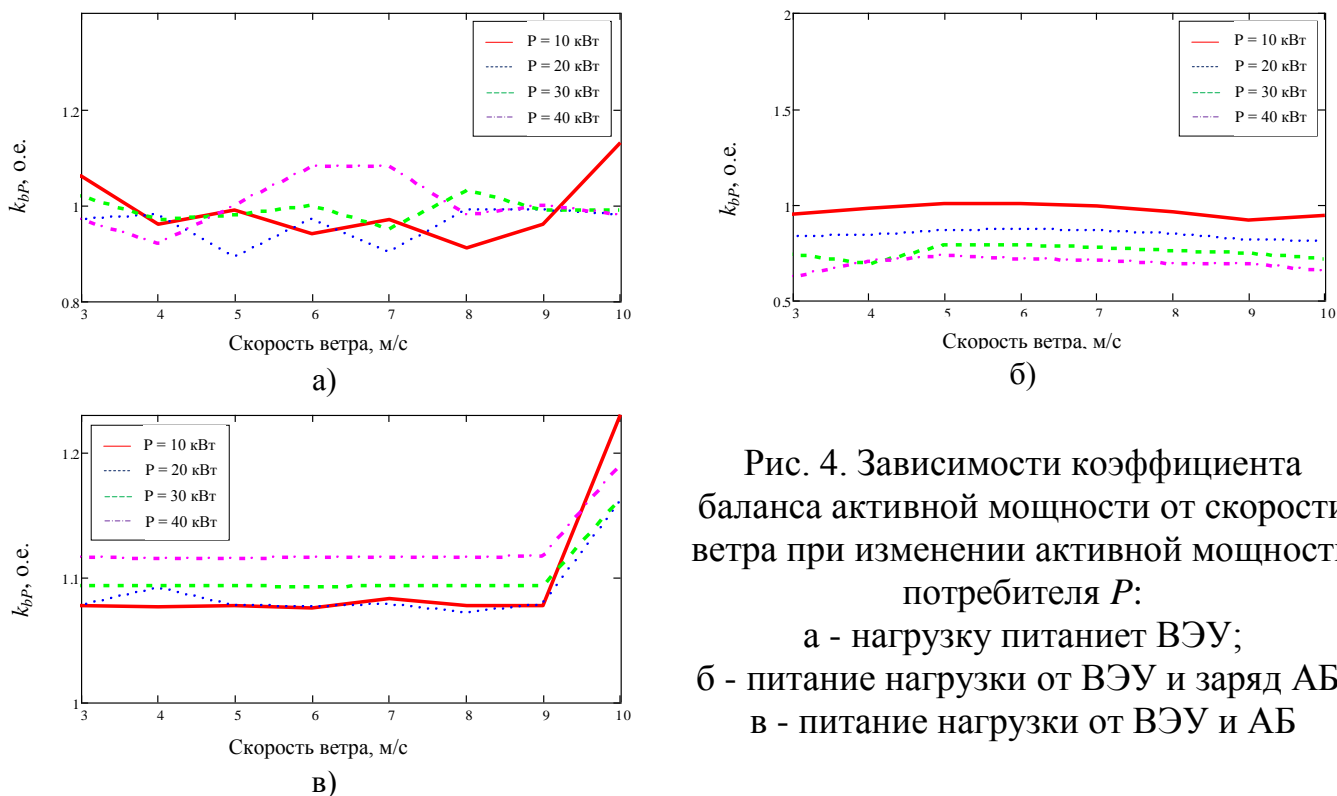


Рис. 4. Зависимости коэффициента баланса активной мощности от скорости ветра при изменении активной мощности потребителя P :
 а - нагрузку питает ВЭУ;
 б - питание нагрузки от ВЭУ и заряд АБ;
 в - питание нагрузки от ВЭУ и АБ

Из рис. 4 видно, что режим заряда АБ (б) самый неблагоприятный. При моделировании наблюдались значительные (до 50%) скачки изменения коэффициента баланса. С увеличением нагрузки, подключенной к ВЭУ, коэффициент баланса снижается. В режиме питания нагрузки от ВЭУ и АБ (в) увеличение нагрузки так же приводит к увеличению коэффициента k_{bP} и переходу системы в ненормальный режим. В режиме без АБ (а), когда потребители получают питание только от ВЭУ, коэффициент k_{bP} наиболее близок к единице, однако наблюдается его сильная зависимость от скорости ветра.

В результате исследования режимов работы автономной СЭС с ВДЭС получены зависимости коэффициентов k_{bP} и k_{bQ} , напряжения, частоты в системе и действующего значения мощности на нагрузке от основных параметров автономной СЭС с ВДЭС и ее режима работы вида (8). В качестве допущения принято, что все зависимости линейные:

$$k_{bP(bQ)} = a \cdot P_{вэу} + b \cdot v + c \cdot P_{дгу} + d \cdot C_{аб} + e \cdot SOC_{аб} + f \cdot P_n + g \cdot \text{tg}\varphi + h \cdot l + i, \quad (8)$$

где $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ – коэффициенты линейного уравнения; v – скорость ветра, м/с; $C_{аб}$ – емкость АБ, А·ч; $SOC_{аб}$ – уровень заряда АБ, %; $\text{tg}\varphi$ – коэффициент мощности СЭС; l – протяженность СЭС от источников до потребителя, км.

Аналогичные характеристики можно получить для любой конфигурации СЭС с ВДЭС путем модификации разработанных имитационных моделей.

Критерии и алгоритм оценки режима работы автономной СЭС с ВДЭС позволяют определить нормальные и ненормальные режимы работы системы. С использованием имитационных моделей получены зависимости коэффициентов, характеризующих режим работы системы, от параметров автономной СЭС и ее конфигурации. Зависимости позволяют определить, как следует изменить режим СЭС с ВДЭС, чтобы избежать нарушения нормального режима работы системы.

Третья глава посвящена разработке универсального преобразователя напряжения (УПН) для подключения энергоустановок ВДЭС к автономной СЭС и алгоритма его функционирования, поддерживающего нормальные режимы работы системы.

Общая структура УПН (рис. 5) строится по принципу двойного преобразования с промежуточным звеном постоянного тока (емкостный накопитель). УПН выполняется на базе трехфазного модифицированного инвертора напряжения с нулевым проводом, обеспечивающего работу в режимах активного выпрямителя и конвертора напряжения (AC/DC и DC/DC).

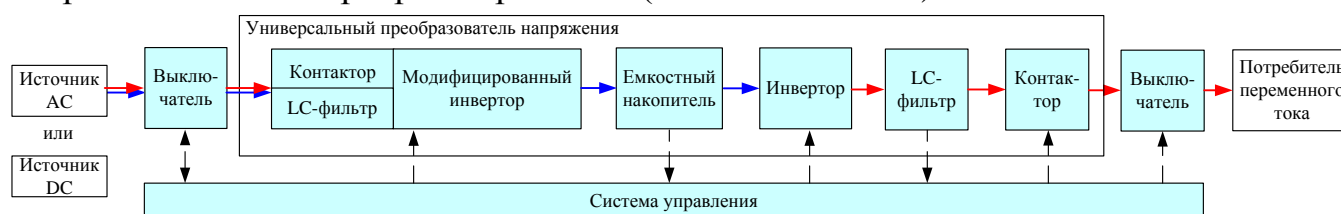


Рис. 5. Структурная схема УПН

В отличие от аналогов, УПН позволяет подключать внешние источники электрической энергии как переменного, так и постоянного тока с широким диапазоном номинальных выходных напряжений. Система управления идентифицирует параметры подключенного источника с последующей подачей управляющих сигналов на модифицированный инвертор. В конструкции УПН предусмотрена возможность увеличения числа подключенных модулей для наращивания функционала и мощности устройства.

Разработан алгоритм работы УПН, учитывающий параметры выходного напряжения подключаемых источников энергии и требования обеспечения нормального режима работы автономной СЭС с ВДЭС. Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рис. 6.

В основном цикле работы устройства постоянно контролируется состояние источника, емкостного накопителя и режим работы автономной СЭС. В случае отклонения от нормы происходит программная корректировка режима работы модифицированного инвертора в условиях синусоидальной ШИМ-модуляции с учетом сигналов датчиков обратных связей по току и напряжению до возврата системы в исходное состояние. В случае невозможности ликвидации аварийного режима УПН отключает менее ответственную часть нагрузки.

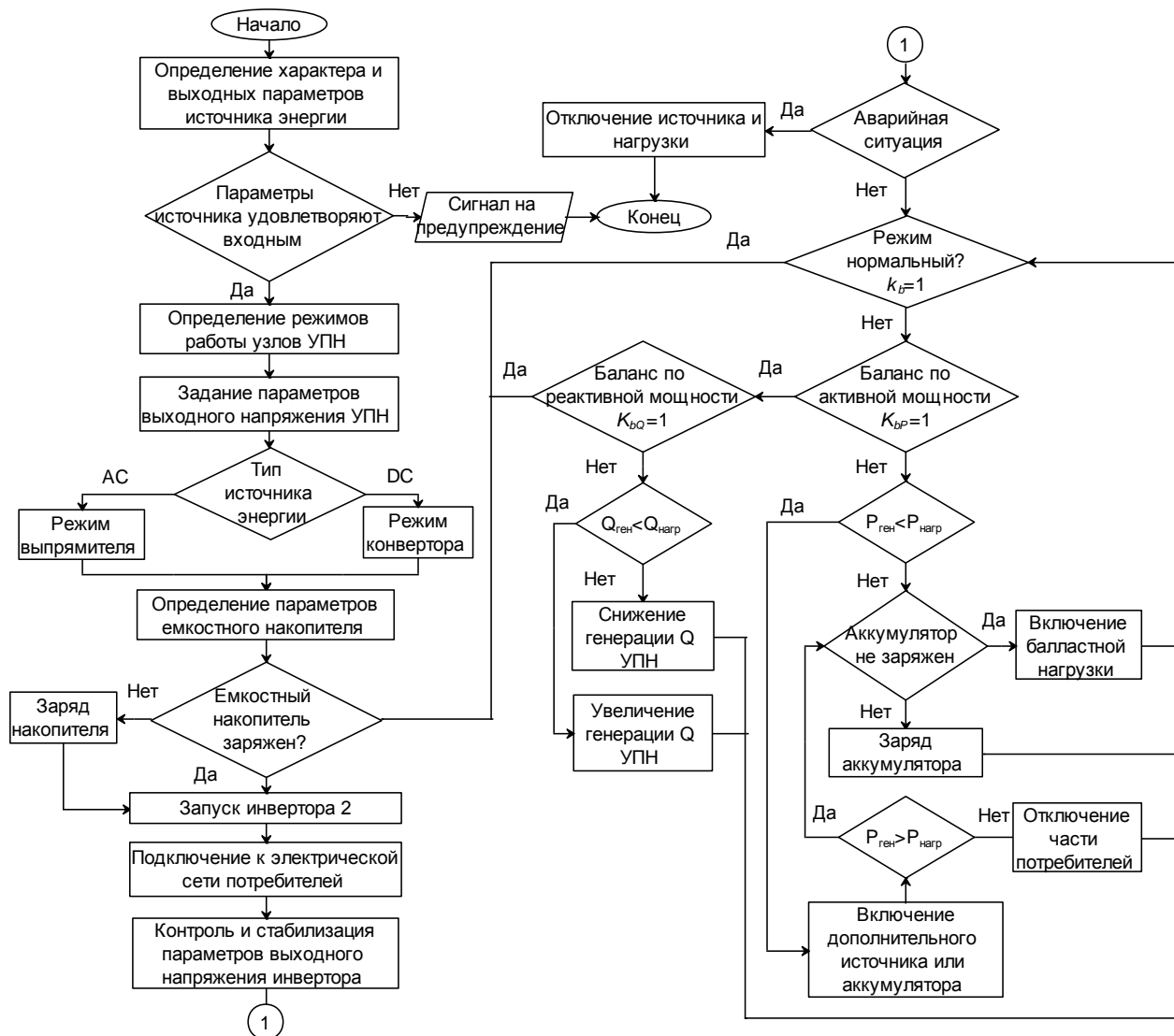


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы УПН, учитывающего требования обеспечения нормального режима работы автономной СЭС с ВДЭС

Кафедрой «ЭССЭ» НГТУ при участии автора создан опытный образец УПН на полную мощность нагрузки 2 кВА (рис. 7,а). Проведены испытания инвертора напряжения 2 УПН, преобразующего постоянное напряжение в трехфазное переменное 380 В 50 Гц. Измерения выполнялись последовательно в каждой из трёх фаз инвертора. На рис. 7, б приведены осциллограммы напряжения емкостного накопителя и на шинах нагрузки.

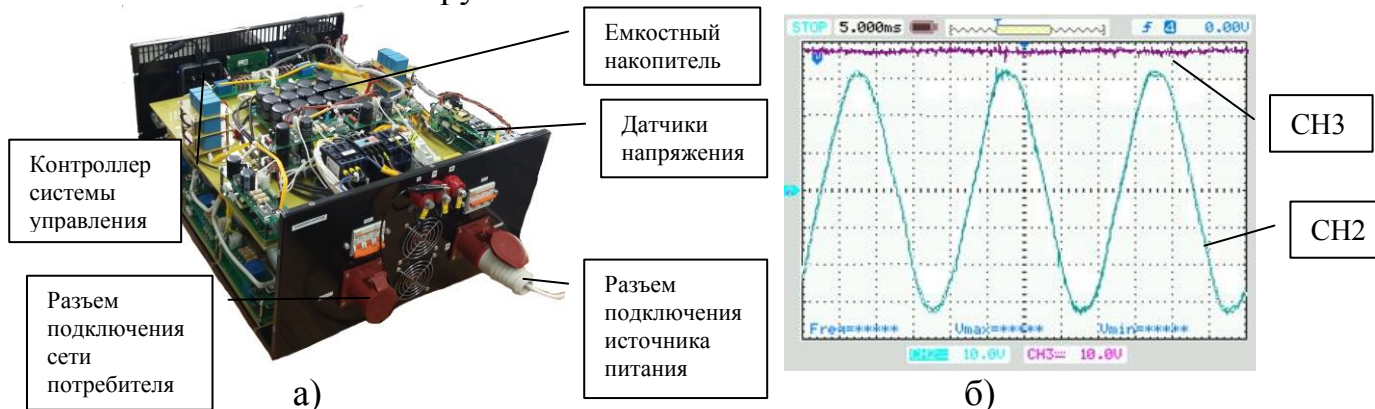


Рис. 7: а – внешний вид опытного образца УПН; б – осциллограммы напряжения емкостного накопителя (вход осциллографа CH2) и в сети нагрузки (CH3)

Проведены исследования качества электрической энергии потребителей, подключенных к автономной СЭС через УПН, для двух вариантов используемого источника питания – переменного 220/380 В 50 Гц (рис. 8, а) и постоянного тока ± 200 В (рис. 8, б).

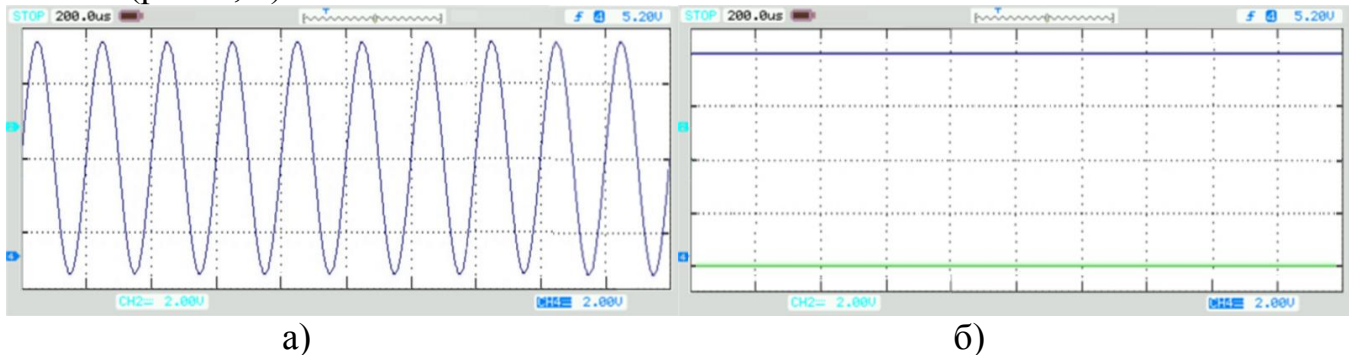


Рис. 8. Осциллограммы напряжения источника питания:
а) переменного тока; б) постоянного тока

При запуске УПН в течение 0,02 с происходит идентификация типа подключенного источника питания. УПН с задержкой 0,005 с выбирает режим работы модифицированного инвертора (выпрямитель или конвертор). Таким образом, через 0,025 с УПН готов к работе, и напряжение источника подается на емкостный накопитель. После этого запускается инвертор напряжения и подается питание на нагрузку (рис. 9). Осциллограммы показывают, что в обоих случаях потребитель получает питание уже через 0.03 с после включения УПН. При резко несимметричной нагрузке система питающих напряжений автономного потребителя остается симметричной. Это достигается средствами пофазной стабилизации напряжения инвертора напряжения.

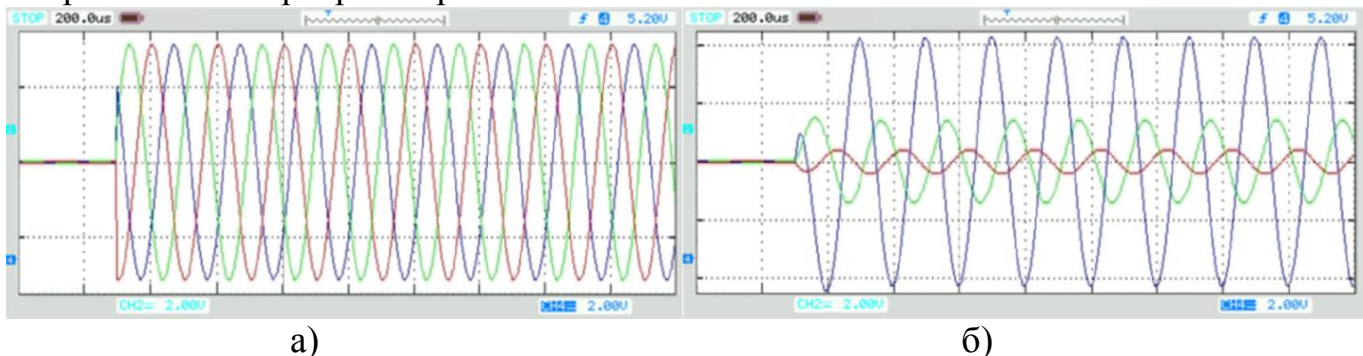


Рис. 9. Осциллограммы:
а) напряжение на нагрузке; б) ток, потребляемый нагрузкой

В каждом опыте проводились измерения качества электрической энергии на шинах потребителя: напряжение на нагрузке 380 В, частота 50 Гц, коэффициенты несимметрии не превышали 2%, а суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не превышал 4%.

Проведенные испытания УПН подтвердили эффективность его применения на ВДЭС: качество электрической энергии удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013, а наращивание входных модулей УПН позволяет реализовать параллельную работу нескольких источников на одну нагрузку.

Четвертая глава посвящена разработке рекомендаций по повышению эффективности автономных СЭС с ВДЭС.

Исследования показали, что схема соединения энергоустановок ВДЭС на постоянном токе имеет преимущества, по сравнению со схемой на переменном токе.

Эффективность выработки электроэнергии выше у ВЭУ с синхронными генераторами на постоянных магнитах. Для поддержания частоты и стабильного напряжения ВЭУ должна подключаться к нагрузке через вставку выпрямитель - инвертор.

Дополнительным способом повышения эффективности передачи электроэнергии является создание комбинированных систем электроснабжения. Подключение потребителей постоянного тока напрямую к ШПТ позволяет снизить потери за счет исключения дополнительных преобразований энергии и решить проблемы устойчивости передачи электроэнергии.

Для всех типов ВДЭС рекомендуется использовать накопители энергии, которые будут сглаживать небалансы между генерацией и потреблением, покрывать пики электрических нагрузок во время их максимума, а также позволят реализовать более экономичный режим работы ДГУ.

Применение модулей УПН при подключении ВДЭС к автономным СЭС обеспечит потребителей электроэнергией требуемого качества.

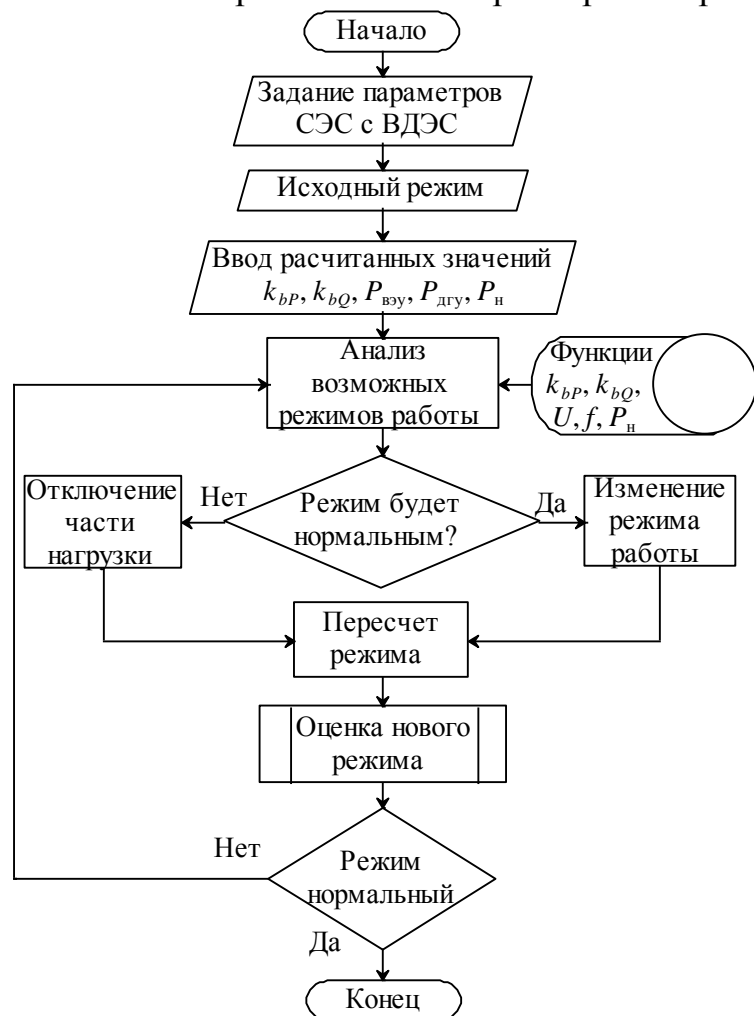


Рис. 10 – Алгоритм обеспечения нормальных режимов работы СЭС с ВДЭС

Автором разработан алгоритм обеспечения нормальных режимов работы СЭС с ВДЭС (рис. 10).

При обнаружении факта нарушения нормального режима работы параметры текущего режима работы СЭС с ВДЭС передаются в блок анализа возможных режимов работы. С использованием базы данных со значениями функций (8) происходит подбор режима, который приведет к восстановлению нормального функционирования СЭС. Если в текущий момент изменение режима работы (включение и отключение АБ, ДГУ, БН) приводит к нужному эффекту, система управления подает команды на органы управления ВДЭС. Затем происходит пересчет нового режима и проводится его оценка по алгоритму (рис. 2).

Одним из стимулов сооружения ВДЭС является их экологичность. Исследования акустического воздействия ВЭУ

малой мощности (до 100 кВт) позволили установить минимально допустимые размеры санитарно-защитной зоны – от 50 до 120 метров в зависимости от типа ВЭУ. Оценка вредных выбросов ДГУ мощностью от 10 до 100 кВт показала, что

радиус воздействия составляет от 15 до 100 м (в зависимости от мощности ВДЭС), а значит, оно носит локальный характер.

Рекомендации по повышению эффективности подтверждены технико-экономическим расчетом проекта по реконструкции дизельной электростанции в энергоудаленном селе Мурманской области. Сооружение ВДЭС позволяет снизить себестоимость электроэнергии на 40%, а предложенные схемные решения сопряжения энергоустановок ВДЭС и алгоритмы управления, учитывающие требования обеспечения нормальной работы, позволяют построить эффективную автономную СЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представляемой работе получены следующие основные результаты.

1. Выполнен комплексный анализ автономных СЭС с ВДЭС, показавший большое разнообразие типов и параметров оборудования. Разработана классификация автономных СЭС с ВДЭС.

2. Выполнен анализ методов повышения эффективности автономных СЭС с ВДЭС, определены критерии эффективности, основными из которых являются: показатели качества электрической энергии; надежности электроснабжения; экономичности и экологичности.

3. Предложены критерии для оценки режима работы автономной СЭС с ВДЭС: устойчивость работы ВЭУ; отсутствие асинхронного хода синхронного генератора; отсутствие обратного потока мощности в ДГУ; отсутствие уравнительных токов в системе; сохранение устойчивости узла нагрузки.

4. Разработан универсальный алгоритм оценки режима работы автономной системы, позволяющий выделить нормальные и ненормальные режимы работы автономной СЭС с ВДЭС.

5. Разработаны имитационные модели автономной СЭС с ВДЭС, с соединением энергоустановок на постоянном и переменном токе, которые позволяют проводить исследования режимов работы ВДЭС.

6. Установлены закономерности влияния параметров и схемы подключения энергоустановок и потребителей автономной системы на режим работы СЭС с ВДЭС; выявлены параметры режима, приводящие к нарушениям нормального режима работы системы.

7. Предложены технические решения по подключению энергоустановок ВДЭС к автономной СЭС через универсальный преобразователь напряжения (УПН).

8. Разработан алгоритм работы УПН в составе автономной СЭС с ВДЭС, учитывающий параметры выходного напряжения подключаемых источников энергии и требования к обеспечению нормального режима работы СЭС с ВДЭС.

9. Проведены экспериментальные исследования качества электрической энергии на шинах потребителей, получающих питание через УПН. Установлено, что качество электрической энергии удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144-2013: напряжение на нагрузке 380 В, частота 50 Гц, коэффициенты несимметрии $< 2\%$, а суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $< 4\%$.

10. Разработаны рекомендации по повышению эффективности автономных СЭС с ВДЭС и алгоритм обеспечения нормального режима работы СЭС с ВДЭС при его нарушении.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Чивенков, А.И. Исследование универсального преобразователя напряжений для подключения энергоустановок ВДЭС / А.И. Чивенков, Е.Н. Соснина, И.А. Липужин // Инженерный вестник Дона, 2017. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4368.

2. Соснина, Е.Н. Исследование статической устойчивости электротехнических комплексов виртуальных электростанций / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин**, А.Ю. Кечкин // Вест. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. технические науки, 2017. – № 2 (54). – С. 121-129.

3. Соснина, Е.Н. Экологическое воздействие ветродизельных электростанций на экосистемы и здоровье населения / Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин** // Научно-практический журнал «Экология человека». – Архангельск, ГБОУ ВПО «СГМУ», 2015. – №12. – С. 3-9.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

4. Sosnina, E. Stability investigation of the virtual power plants electrical systems / E. Sosnina, **I. Lipuzhin**, A. Shalukho, A. Kechkin // International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 10, Number 24, 2015. – P. 44363-44368.

5. Sosnina, E. Research of isolated electrical systems stability with wind-diesel hybrid power stations / E. Sosnina, A. Shalukho, **I. Lipuzhin** // Proc. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk, Russia, 2016. – P. 1-5.

6. Sosnina, E. Virtual power plant static stability assessment / E. Sosnina, A. Shalukho, **I. Lipuzhin** // Proc. 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA). – Melbourne, Australia, 2016. – P. 932-936.

7. Sosnina, E. Development and research of the universal coupling device for different kinds of electric power sources / E. Sosnina, A. Chivenkov, **I. Lipuzhin** // Proc. 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Latin America (ISGT Latin America). – Quito, Ecuador, 2017. – P. 456-461.

Патенты и свидетельства о регистрации

8. Пат. на полезную модель RU 137642 U1, МПК H02J3/28 (2006.01) Система бесперебойного энергоснабжения / Чивенков А.И., Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., **Липужин И.А.**, Шалухо А.В.; заявл. № 2013138616/07 от 21.08.2013; опубл. 20.02.2014. Бюл. № 5.

9. Программа для ЭВМ «Имитационная модель локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией» / Соснина Е.Н., Шалухо А.В., **Липужин И.А.** Свидетельство о гос. регистрации №2015618363; заявл. №2015614914 от 09.06.2015; опубл. 06.08.2015.

Работы, опубликованные в других изданиях

10. Sosnina, E. Research of static stability of autonomous power supply system with wind-diesel power plant / E. Sosnina, A. Shalukho, **I. Lipuzhin** // The challenges of contemporary science. Theory and applications. – Warsaw, 2014. – P. 61-62.

11. Sosnina, E. Stability criteria of the local power supply system with a wind-diesel power plant / E. Sosnina, A. Shalukho, **I. Lipuzhin** // 10 Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology. – Warsaw, 2015. – pp. 77-78.

12. Соснина, Е.Н. Исследование статической устойчивости автономной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин** // Федоровские чтения 2014. Материалы XLIV Международной научно-практической конференции (Москва 12-14 ноября 2014 года). / Под ред. Б.И. Кудрина и Ю.В. Матюниной. – М.: МЭИ, 2014. – С. 164-168.
13. Соснина, Е.Н. Методы оценки статической устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин**, А.А. Смирнов // Сборник научно-технических статей XXXIII региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». – Н.Новгород, НГТУ, 2014. – С. 53-57.
14. Соснина, Е.Н. Разработка имитационной модели для исследования устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией / Е.Н. Соснина, С.А. Анисимов, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин**, А.А. Смирнов // Вестник НГИЭИ (технические науки), 2015. – №4 (47). – С. 10-13.
15. **Липужин, И.А.** Исследование устойчивости ветро-дизельного комплекса с использованием имитационного моделирования / **И.А. Липужин** // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Э.Ю. Абдуллазянов. В 3 т.; Т. 2. – Казань: КГЭУ, 2015. – С. 143-144.
16. Соснина, Е.Н. Исследование устойчивости электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, С.А. Анисимов, **И.А. Липужин**, А.А. Смирнов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2015. – № 1 (108). – С. 203-208.
17. Соснина, Е.Н. Воздействие ветро-дизельных электростанций на окружающую среду / Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин** // Международная научно-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). Т. 1. Электроэнергетика. – Иваново, ФГБОУВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2015. – С. 325-328.
18. Соснина, Е.Н. Исследование устойчивости ветро-дизельной электростанции / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин**, А.А. Смирнов // Материалы конференции // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия-2015»: Сборник докладов. – Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2015. – С. 54-55.
19. Соснина, Е.Н. Оценка устойчивости локальной системы электроснабжения с ветро-дизельной электростанцией на основе имитационного моделирования / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин** // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конф., Иваново. В 2 т. Т 1. – Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2015. – С. 314-317.
20. Соснина, Е.Н. Simulink-модель ветро-дизельной электростанции с вставкой постоянного тока / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин** // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции Актуальные проблемы электроэнергетики. А.Б. Дарьенков. Нижний Новгород, 2015. – С. 155-160.
21. Соснина, Е.Н. Техничко-экономический анализ применения ветро-дизельных электростанций для электроснабжения энергоудаленных поселений / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин**, Т.А. Александрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2016. – №1(112). – С. 65-72.

22. Соснина, Е.Н. Исследования устойчивости изолированных систем электроснабжения с ветро-дизельными электростанциями / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, **И.А. Липужин** // Пром-Инжиниринг: труды II международной научно-технической конференции. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – С. 280-285.

23. Соснина, Е.Н. О причинах нарушения устойчивости локальной системы электроснабжения с ВДЭС / Е.Н. Соснина, **И.А. Липужин**, Т.А. Александрова // Главный энергетик, 2016. – №10. – С. 52-57.

Личный вклад соискателя. Основные положения диссертации получены лично автором. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: аналитический обзор, постановка задачи и анализ результатов [3, 17, 21], разработка алгоритма оценки режима работы [2, 4-6, 18], критерии нормального режима [2, 11, 13, 23], разработка имитационных моделей [12, 14, 16, 20], исследование нормального режима работы [10, 15, 19, 22], исследования УПН [1, 7].

Подписано в печать _____.____.2017
Бумага офсетная
Тираж 120 экз.

Формат 60x90/16
Усл. п.л.
Заказ №

Типография НГТУ
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24